

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

RONANN DE OLIVEIRA GOMES DE ARRUDA

ESTUDO DA ARTE DO USO DE REDES NEURAIS, GEOESTATÍSTICA E DE
MÉTODOS DE REGRESSÃO NA ESTIMATIVA DO VOLUME DA MADEIRA

CURITIBA

2018

RONANN DE OLIVEIRA GOMES DE ARRUDA

ESTUDO DA ARTE DO USO DE REDES NEURAIS, GEOESTATÍSTICA E DE
MÉTODOS DE REGRESSÃO NA ESTIMATIVA DO VOLUME DA MADEIRA

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao curso de especialização em Manejo Florestal de Precisão, do Programa de Educação Continuada em Ciências Agrárias, da Universidade Federal do Paraná, como pré-requisito para obtenção do título de especialista.

Orientadora: Prof. Me. Ângela Klein Hentz

Co-orientadora: Prof. Dra. Ana Paula Dalla Corte

CURITIBA

2018

RESUMO

Nos povoamentos florestais, o volume de madeira é considerado uma das variáveis de difícil obtenção, uma vez que além dos custos referentes as coletas de dados, têm-se os possíveis erros amostrais, que podem acarretar na super ou subestimativa do estoque de interesse. A geoestatística e as Redes Neurais Artificiais (RNAs) vem sendo aplicadas dentre outros objetivos para melhorar a precisão nas estimativas e diminuir os elevados custos dos inventários florestais. Assim, objetivou-se apresentar uma revisão de literatura, um comparativo sobre o uso das ferramentas e metodologias de regressão em relação aquelas ligadas a redes neurais artificiais e geoestatística para a estimativa do volume da madeira. A metodologia de pesquisa teve como base uma revisão bibliográfica de caráter científico tendo como foco a utilização de tecnologias de apoio ao inventário. Foi possível observar, a partir dos artigos analisados que o uso das metodologias de RNAs e geoestatística, apresentam-se como alternativas viáveis e usuais para a estimativa do volume da madeira quando comparadas aos métodos de regressão, Entre os trabalhos observados que foram utilizados métodos de regressão, foi possível verificar que o erro padrão variou de 0,07 % a 11,92 %, já métodos com o uso das técnicas das RNAs a variação foi de 1,9% a 6,08%, e os que utilizaram geoestatística apresentaram uma variação do erro de 1,12% a 8 %.

Palavras-Chave: Mensuração florestal, Geotecnologias, Inteligência artificial.

ABSTRACT

In forest stands, the wood volume is considered a challenging variable to be found, since as well as the costs related to data collection there is also possible sampling errors which can result in an over or underestimation of the storage of interest. Geostatistics and Artificial Neural Networks (ANNs) are being applied among others goals to improve the precision in assessments and to reduce the high costs of forest inventory. Therefore, this study aimed to present, through a literature review, a comparative about the use of tools and regression methodologies related to those connected with artificial neural networks and geostatistics, to estimate the volume of wood. The research methodology was based in a bibliographic review of scientific nature focusing in the use of support tools to the inventory. It was possible to observe, from articles analyzed, that the use of ANNs methodologies and geostatistics were presented as feasible alternatives and usual for estimating the wood volume when compared to the regression methods. Among the observed works that used regression methods, it was checked that the standard error varied from 0.07% to 11.92%, and the methods using ANNs techniques varied from 1.9% to 6.08%, and the ones using geostatistics varied from 1.12% to 8%.

Keywords: Forest Measurement; Geotechnologies; Artificial Intelligence

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao Criador por tudo que Ele fez e faz, especialmente pelo dom da vida e do discernimento.

Agradeço a minha família.

Agradeço aos professores do MBA – Manejo Florestal de Precisão, especialmente a minha orientadora Prof. Me. Ângela Klein Hentz que mesmo à distância esteve sempre presente.

Agradeço ao Programa de Educação Continuada em Ciências Agrárias (PECCA) pela oportunidade de me especializar a distância em Manejo Florestal de Precisão.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	6
2. OBJETIVOS	8
2.1.1 Geral	8
2.1.2 Específicos	8
3. METODOLOGIA DE PESQUISA	8
4. REVISÃO E DISCUSSÃO DA LITERATURA.....	9
4.1.Obtenção do volume das árvores.....	10
4.1.1. Cubagem Rigorosa.....	12
4.1.1.1. Método de Smalian para cubagem	13
4.1.1.2. Método de Huber para cubagem	13
4.1.1.3. Método de Newton para cubagem	14
4.1.2.Regressão	15
4.1.3.Redes neurais artificiais	17
4.1.4.Geoestatística	21
4.1.4.1 Semivariograma	22
4.1.4.2. Krigagem e co-krigagem	24
4.2. Comparação entre as metodologias analisadas.....	27
5.CONSIDERAÇÕES FINAIS	29
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	30

1. INTRODUÇÃO

As florestas plantadas exercem papel fundamental no setor florestal brasileiro e mundial, em especial pelo fornecimento de matérias-primas para diversas finalidades, tais como: a produção de celulose, papel, bioenergia, madeira, painéis reconstituídos, fármacos, químicos, entre outros (IBÁ, 2015).

O processo de avaliação do potencial florestal de um determinado ecossistema é construído a partir do conhecimento dos produtos de valor econômico e/ou ambiental que a floresta traz à sociedade (GAMA et al., 2007). Para Péllico-Netto e Brena (1993), o inventário florestal auxilia na aquisição da informação do real potencial de produção de uma floresta, para posterior planejamento do uso dos seus recursos.

As informações referentes ao estoque de madeira, nos sentidos qualitativo e quantitativo, necessárias ao planejamento são obtidas por meio do inventário florestal. Péllico-Netto e Brena (1993), afirmam que nesse processo diversos métodos e metodologias podem ser utilizados a fim de, se obter uma maior precisão na obtenção e estimativa dos dados, com menor custo.

O processo de coleta de dados, para se obter as informações de interesse de um povoamento ou floresta nativa, baseia-se em roteiros pré-estabelecidos em inventários florestais, ou seja, no conjunto de informações que apresentam as mais simples e/ou as mais elaboradas metodologias de coleta e processamento de dados, sendo utilizadas conforme o tipo de floresta e os objetivos que se pretende obter com a realização do mesmo, como nos processos de cubagem e estimativa de volume (BINOTI, 2012).

Thomas et al. (2006) relatam em seus estudos, que o volume da madeira está classificado como uma das informações de maior importância para o entendimento do potencial disponível em um povoamento florestal, pois esta variável pode auxiliar nas análises para a avaliação do estoque de madeira e análise do potencial produtivo das florestas.

O emprego de equações volumétricas constitui umas das principais ferramentas para quantificação da produção de povoamentos florestais, sendo base para o manejo sustentável de plantações florestais (LEITE e ANDRADE, 2003). Contudo, um dos problemas importantes ao conduzir inventários florestais é a definição de equações volumétricas apropriadas, sendo que geralmente são

determinadas pelo material genético, pelo espaçamento inicial, pelo regime de corte e pela idade, e, então, geradas equações específicas, atualizadas de tempos em tempos, gerando gastos consideráveis de recursos humanos e financeiros com o abate de árvores ao longo do tempo para as empresas (LEITE e ANDRADE, 2003).

Os custos do inventário são ainda maiores quando se deseja obter menores erros nas estimativas das variáveis dendrométricas de interesse. Para Binoti (2014), as técnicas e ferramentas que visam melhorar a precisão nas estimativas e minimizar os elevados custos dos inventários florestais, assim como o uso de variáveis de fácil obtenção nos ajustes dos modelos, são importantes. De acordo com Schikowski (2016) a acurácia e precisão no processo de avaliação quantitativa de povoamentos para fins comerciais são imprescindíveis, especialmente a mensuração do volume.

Nogueira et al. (2000) afirmam que nesse processo a geoestatística ou o uso de ferramentas da geotecnologia, bem como o emprego de metodologias como o uso da inteligência artificial, a vantagem de poder reduzir o número de amostras e apresentar precisão nas estimativas, se comparada a estatística clássica.

Trabalhos utilizando metodologias de redes neurais artificiais (RNAs) (Castro et al., 2013; Binoti et al., 2015; Miguel et al., 2016) e geoestatística (Mello, 2009; Sturaro, 2016; Lundgren et al., 2016), ressaltam a geração de estimativas com boa acurácia do volume de madeira ao nível de talhão manejado. Ou seja, enquanto as técnicas convencionais originam estimativas volumétricas precisas para grandes áreas, as técnicas mais desenvolvidas fazem com que as decisões de manejo possam se dar ao nível de talhão, garantindo o máximo retorno financeiro aos investidores.

Toda iniciativa que permita a redução do tempo de execução da cubagem rigorosa e por conseguinte estimativa do volume, sem que seja prejudicada a sua acurácia, é de grande valor para as atividades de inventário e manejo florestal (ANDRADE, 2013). Considerando-se a importância deste tema, este trabalho visa comparar, por meio de uma revisão bibliográfica, as diferentes metodologias aplicadas no estudo da estimativa do volume de povoamentos florestais, dando ênfase nas acurácias obtidas por cada método.

2. OBJETIVOS

2.1.1 Geral

Apresentar por meio de uma revisão de literatura, um comparativo sobre o uso das ferramentas e metodologias de regressão e aquelas ligadas às redes neurais artificiais e geoestatística para a estimativa do volume da madeira.

2.1.2 Específicos

- I. Apresentar uma revisão sobre os métodos de regressão e os ligados as RNAs e geoestatística para determinação de volume de madeira;
- II. Realizar o comparativo com base nos diferentes métodos de regressão, RNAs e geoestatísticos, para a estimação de volume da madeira.

3. METODOLOGIA DE PESQUISA

Este trabalho se tratou de uma pesquisa de revisão bibliográfica de caráter científico. Composta por informações de origem científica nacional e internacional, tendo como foco a utilização de tecnologias de apoio ao inventário. As informações foram coletadas de forma indireta, fundamentadas em fontes como: sites, artigos científicos, teses e periódicos

. As plataformas e banco de dados consultados para conseguir tais materiais foram: Scielo, Science Direct, Scopus e Google Acadêmico, utilizando filtros de pesquisa como período de publicação mais recente e palavras-chave ligadas ao tema proposto.

O levantamento bibliográfico ocorreu durante os meses de outubro e novembro de 2017. A partir dos materiais coletados, foi realizada uma leitura comparativa entre os dados analisados e descritos por diferentes autores, a fim de, que fosse possível apresentar a discussão com base no tema proposto.

4. REVISÃO E DISCUSSÃO DA LITERATURA

Por meio dos trabalhos foi observado como foram conduzidos e avaliados os estudos para metodologias de estimadores de volume, bem como os objetivos principais aos quais os autores têm se proposto analisar, conforme apresentado na tabela 1.

Tabela 1 - Trabalhos desenvolvidos com diferentes espécies florestais, para estimar o volume da madeira.

Autor	Título	Espécie	Tipo de volume analisado	Método
THOMAS et al. (2006)	Comparação de equações volumétricas ajustadas com dados de cubagem e análise de tronco.	Pinus	Com casca/ Talhão	Regressão/ Schumacher-Hall
BINOTI et al. (2014)	Redes neurais artificiais para estimação do volume de árvores	Eucalipto	Com e sem casca/ Talhão	RNA
BINOTI et al. (2014)	Configuração de redes neurais artificiais para estimação do volume de árvores	Eucalipto	Com e sem casca/ Talhão	RNA
BINOTI (2012)	Emprego de redes neurais artificiais em mensuração e manejo florestal.	Eucalipto	Com e sem casca/ talhão	RNA
BINOTI et al. (2015)	Prognose em nível de povoamento de clones de eucalipto empregando Redes Neurais Artificiais	Eucalipto	Com casca/ Talhão	RNA
LUNDGREN et al. (2015)	Estimação do volume de madeira de eucalipto por cokrigagem, Krigagem e regressão.	Eucalipto	Talhão	Regressão/ modelo de Spurr e Geoestatística/ Krigagem e cokrigagem
DRESCHER et al. (2014)	Equações volumétricas para <i>Tectona grandis</i> Linn F. em povoamentos jovens no estado de Mato Grosso	Teca	Com casca/ Talhão	Regressão/ Schumacher-Hall
MENDONÇA et al. (2015)	Identidade de modelos para estimativa do volume de pinus	Pinus	Individual	Regressão/ Schumacher-Hall e Spurr
SANQUETTA et al. (2016)	Estimação de volumes de <i>araucaria angustifolia</i> (bertol.) O. Kuntze por fatores de forma em classes diamétricas e modelos de regressão.	Araucária	Com casca/ Talhão	Regressão/ modelo de Spurr log

Continuação...				
VENDRUSCOL O (2017)	Modelagem aplicada ao manejo de povoamentos de <i>Tectona grandis</i> L.f em Mato Grosso	Teca	Com casca/ Talhão	RNA
MELLO (2004)	Geoestatística aplicada ao inventário florestal	Eucalipto	Talhão	Regressão e Geoestatística/ Krigagem
SANTANA (2011)	Avaliação de técnicas geoestatísticas no inventário de povoamentos de <i>Tectona grandis</i> L. f.	Teca	Talhão	Geoestatística/ Krigagem
AZEVEDO et al. (2011)	Estimativas volumétricas em povoamentos de eucalipto sob regime de alto fuste e talhadia no sudoeste da Bahia.	Eucalipto	Individual	Regressão
GORGENS et al. (2009)	Estimação do volume de árvores utilizando Redes Neurais Artificiais	Eucalipto	Individual	RNA
LEAL et al. (2015)	Redes neurais artificiais na estimativa de volume em um plantio de eucalipto em função de fotografias hemisféricas e número de árvores	Eucalipto	Individual	RNA e Regressão
LIMA (2015)	Comparação de diferentes métodos de cubagem de madeira de povoamento de <i>pinus taeda</i> L. na região serrana de Santa Catarina	Pinus	Individual	Regressão
SILVA et al. (2009),	Ajuste do modelo de Schumacher e Hall e aplicação de redes neurais artificiais para estimar volume de árvores de eucalipto	Eucalipto	Com e sem casca/ Individual	Regressão e RNA
SILVA et al. (2014)	Modelos de regressão para estimação do volume de árvores comerciais, em florestas de Paragominas	Eucalipto	Com casca/ Individual	Regressão
MIGUEL et al (2015)	Redes neurais artificiais para a modelagem do volume de madeira e biomassa do cerrado com dados de satélite	Floresta nativa Cerrado	Talhão	RNA e Regressão

4.1 Obtenção do volume das árvores

Leite (2008), afirma que uma exploração florestal só pode ter sucesso no planejamento, vistoria e fiscalização, se tiver como base um sistema eficiente de quantificação do volume de madeira. O volume sólido de uma árvore pode ser determinado de diversas formas, analiticamente, graficamente e a partir do peso da árvore (MACHADO e FILHO, 2003).

Para que se obtenha a estimativa do volume das árvores, é necessária a utilização de metodologias de cubagem que pode serem feitas tanto com a árvore abatida (mensuração direta ou destrutiva) quanto com a árvore em pé (mensuração indireta ou não destrutiva).

Dentre os vários métodos diretos de obtenção do volume dos fustes das árvores, a cubagem através do método do xilômetro é a única que fornece o valor paramétrico do volume, ou seja, o volume verdadeiro (YOUNG et al., 1967; STERNADT, 2001; MACHADO e FIGUEIREDO FILHO; 2003).

O método do xilômetro baseia-se no deslocamento no nível da água, ou seja, consiste na instalação de um tubo cilíndrico reforçados por aros com finalidade de evitar uma possível deformação e na parte exterior do tubo é colocado um outro tubo de vidro graduado, tal como os níveis d'água que se utilizam em caldeiras, e para que as leituras sejam reais (STERNADT, 2001). Para árvores de oriundas de florestas tropicais por exemplo, essa técnica torna-se extremamente trabalhosa, e por conseguinte impraticável e operacionalmente impossível para árvores de grande porte (OLIVEIRA, 2010).

A árvore mensurada em pé, geralmente é escalada, ou os dados podem ser coletados com o auxílio de equipamentos como demonstrado na Figura 1 (LACHINI, 2010).



Figura 1 A - B: Figura ilustrativa de um conjunto de equipamentos utilizados para auxiliar na coleta de dados para a estimativa do volume de madeira: A - reslascópio, B - dendrômetro óptico.

O uso de técnicas e métodos possíveis de serem executados para realizar a cubagem das árvores é fundamentalmente importante (MACHADO e FILHO, 2003). Gomes (1957) citado por Oliveira (2010), ressalta que a cubagem rigorosa por via de regra deve ser realizada respeitando as classes de diâmetro e de altura e que a determinação do volume em árvores derrubadas, permite maior precisão no processo de cubagem.

4.1.1 Cubagem Rigorosa

A cubagem rigorosa consiste na determinação do volume das árvores por meio de uma divisão do fuste em um número “n” de seções (toras) e do cálculo do volume de cada uma dessas seções. De acordo com trabalhos realizados por Scolforo e Figueiredo Filho (1998) e Schreuder et al. (1993), desenvolvendo pesquisas com técnicas de dendrometria e manejo florestal, a cubagem rigorosa, apresenta precisão nos resultados, podendo haver variações de um método para outro.

Os maiores percentuais de erro citados no trabalho de Sternadt (2001), são encontrados quando as toras assumem o formato de saia, apresentando uma extremidade mais afilada e outra mais alargada, conforma apresentado na figura 2.

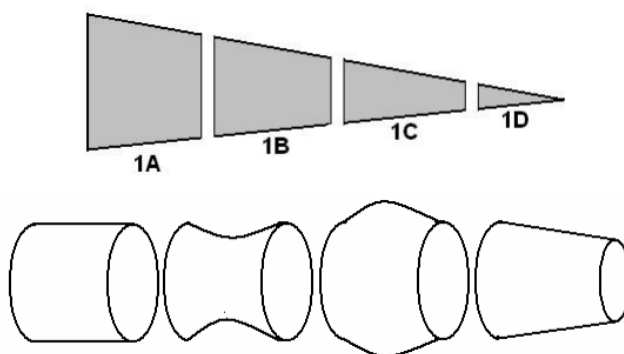


Figura 2 - Formas que o tronco de uma árvore pode assumir, sólidos geométricos (Soares et al., 2006). Onde: **A = cilindro** cujo $V = a_1 \cdot 1A$; **B = neilóide** cujo $V = b_1 \cdot 1B/4$; **C= parabolóide** cujo $V = c_1 \cdot 1C/2$; e **D= cone** cujo $V = d_1 \cdot 1D/3$

A soma dos volumes de todas as seções da tora seccionada resulta no volume da árvore (SANTOS, 2006). Assim, Machado e Filho (2003), afirmam que

se usadas seções com comprimentos menores, o volume calculado será mais acurado, seja qual for o método tradicional empregado.

4.1.1.1. Método de Smalian para cubagem

A cubagem rigorosa pelo método de Smalian consiste na medição dos diâmetros ou circunferências nas extremidades de cada seção do tronco (LIMA, 2015), conforme apresentado na Figura 3.

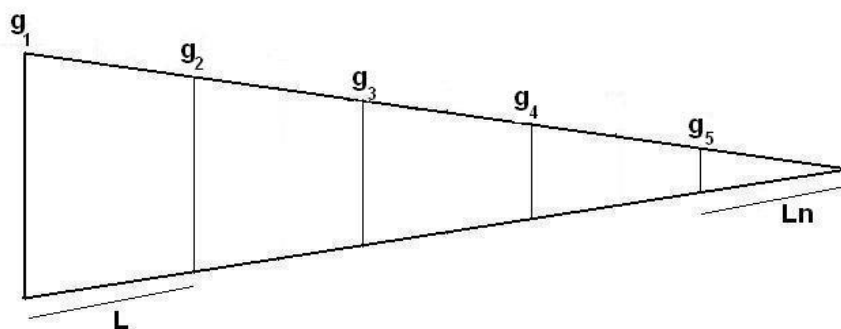


Figura 3 - Seccionamento do tronco para a aplicação da Fórmula de Smalian. Fonte: Machado e Figueiredo Filho (2003).

Determina-se então o volume de cada seção pela Equação 1 (MACHADO e FILHO, 2003):

$$V_i = \frac{(g_1 + g_2)}{2} l \quad (1)$$

Onde: V = volume da seção i da tora em m³; g₁ = área transversal na base da; seção i da tora (m²); g₂ = área transversal no topo da seção i da tora (m²); l = comprimento da seção da tora em metros; i = número de seções da tora (i= 1,2, 3,.....,n).

4.1.1.2. Método de Huber para cubagem

Conhecida também como a fórmula da seção intermediária, pois o volume é obtido pelo produto a área da seção intermediária g_{1/2}, pelo comprimento da tora, sendo que para o volume total da tora, também se deve adicionar o volume do cone da tora final, se esse existir (SILVA e NETO, 1979), de acordo com o apresentado

com a Figura 4. Esse método assemelha-se com o método de Smalian, pois o volume da tora é obtido pela soma do volume das diferentes seções mais os volumes da ponta e da cepa quando necessário (OLIVEIRA, 2010).

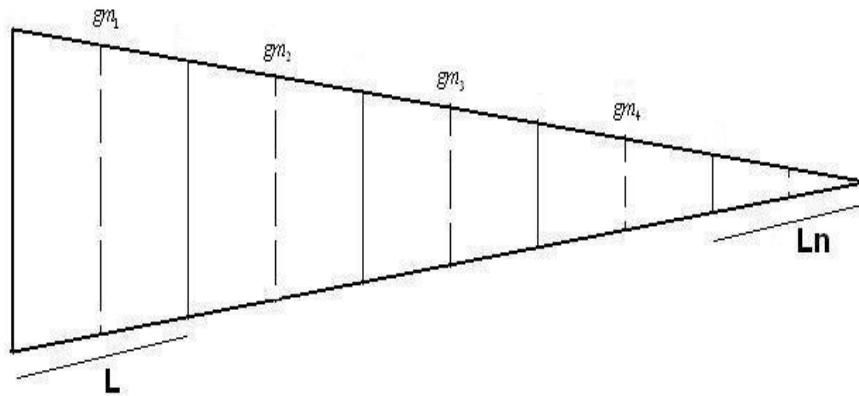


Figura 4: Seccionamento do tronco para a aplicação da Fórmula de Huber. Fonte: Machado e Figueiredo Filho (2003).

Desta forma o volume da seção da tora é dado por (com g_m e l já definidos), Equação 2:

$$V = g_m \cdot L \quad (2)$$

Onde: g_m = área seccional, em m^2 tomada no meio da seção da tora.

4.1.1.3. Método de Newton para cubagem

Machado e Figueiredo Filho (2003) afirmam em seus estudos que no método de Newton a cubagem parte de dados coletados de três medições ao longo de cada seção da tora, sendo que a área seccional medida na parte média da seção recebe um peso maior que o das extremidades, conforme Figura 5. E assim como nos métodos anteriores o volume total é alcançado pela soma do volume das seções mais os volumes da ponta e da cepa quando necessário.

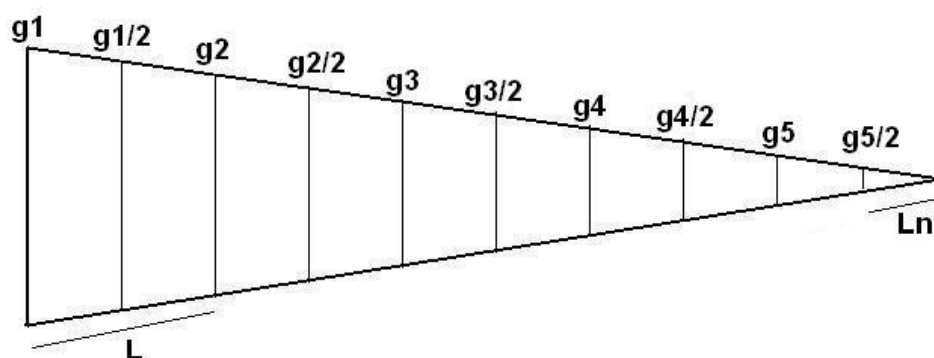


Figura 5: Seccionamento do tronco para a aplicação da Fórmula de Newton. Fonte: Machado e Figueiredo Filho (2003).

O volume de cada seção é determinado pela Equação 3:

$$V_i = \frac{(g_1 + 4g_m + g_2)}{6} l \quad (3)$$

Onde: g_1 - área seccional da extremidade inferior do torete (m^2); g_2 - área seccional da extremidade superior do torete (m^2); e g_m - área seccional no meio do torete (m^2).

Existem outros métodos de cubagem de toras, como dito anteriormente: o método do xilômetro; o método da FAO; o método Pressler; o método Grosenbaugh; o método seccional padrão; o método com afilamento constante (*taper-step*); a sobreposição de seções de Bailey; a fórmula de Hossfeld (Machado e Filho, 2003); o método Frankon (IBAMA, 2002) e outros (LEITE, 2008). Entretanto, esses métodos apresentam uma frequência de utilização menos comum, seja pelas dificuldades de aplicação, pela acurácia inferior aos métodos mais utilizados, ou pelos custos.

4.1.2. Regressão

No setor florestal, as equações volumétricas são fundamentalmente importantes para nas tomadas de decisão nas atividades do manejo florestal. Segundo Baima et al. (2001) a análise de regressão, pode ser utilizada com intuito de formar uma base de dados sólida para elaboração de planos de manejo, através

de equações de volume devidamente ajustadas às características do povoamento objeto de manejo, para que se obtenham dados com acurácia.

Existem vários modelos que são ajustados conforme as características do povoamento, e conforme a Tabela 2, é possível observar alguns de uso corrente na modelagem volumétrica (SCOLFORO, 1998; BELCHIOR, 1996; BAIMA et al., 2001; SCHNEIDER e TONINI, 2003; BATISTA et al., 2004).

Tabela 2: Modelos tradicionais ajustáveis para estimativa dos volumes.

N	Designação - Autor	Modelo
01	Kopezky-Gehart	$vol = \beta_0 + \beta_1 d^2$
02	Hohenald e Krenn	$vol = \beta_0 + \beta_1 \ln d$
03	Husch	$\ln vol = \beta_0 + \beta_1 \ln d$
04	Brenac	$\ln vol = \beta_0 + \beta_1 \ln d + \beta_2 (1/d)$
05	Spurr	$\ln vol = \beta_0 + \beta_1 \ln (d^2 h)$
06	Schumacher-Hall	$\ln vol = \beta_0 + \beta_1 \ln d + \beta_2 \ln h$
07	Meyer	$vol = \beta_0 + \beta_1 d + \beta_2 h + \beta_3 d^2 + \beta_4 (d^2 h) + \beta_5 (dh)$

v = volume estimado (m³); ln = logaritmo neperiano; d = diâmetro a 1,30 m do solo (cm); h = altura total da árvore (m); β_i = parâmetros dos modelos a serem estimados.

Para a seleção do modelo de regressão geralmente é lançado mão de critérios como: o coeficiente de determinação ajustado (R^2_{aj}), o Erro padrão da estimativa (S_{yx}), Coeficiente de variação (CV%), Valor de F calculado; e Valor ponderado dos escores estatísticos (VP) (AZEVEDO, et al., 2011). Assim, Silva et al. (2014), quando testaram oito modelos estatísticos, visando estimar, com maior acurácia, os volumes individuais das espécies em uma floresta Ombrófila densa, no município de Paragominas, concluíram que o modelo de Schumacher e Hall apresentou o melhor ajustamento dos dados.

Com relação a valores para povoamentos florestais, Thomas et al. (2006) avaliando nove modelos matemáticos para o volume em um plantio de *Pinus taeda*

L., observou R^2_{aj} de 0,938 a 0,99, e com base na estimativa do erro, verificou que o modelo que mais se ajustou foi também o de Schumacher e Hall, com um erro de 9,7%. Corroborando com Mendonça et al. (2015), que estudou os modelos de Spurr e Schumacher e Hall, para a estimativa de volume em duas espécies de *Pinus* ssp., e verificaram que a equação ajustada de Schumacher e Hall, apresentou maior acurácia, com erros de 7,05% e 5,58 respectivamente.

Trabalhos como os realizados por Akossou et al., (2013) e Drescher et al., 2014, analisaram 17 modelos de regressão e modelagem, o modelo de Schumacher e Hall, apresentou ótima acurácia nas estimativas de volume de um povoamento de teca com um erro de 3,44%, e são de suma importância, pois ressaltam as vantagens de metodologias já utilizadas com sucesso.

Com base nos trabalhos realizados com os modelos usados na regressão, o proposto por Schumacher e Hall em 1993 está entre os mais utilizados no meio florestal, uma vez que resulta na maioria das vezes em estimativas mais precisas quando comparadas com as geradas por outros modelos (LEITE e ANDRADE, 2003; CAMPOS e LEITE, 2013). Entretanto, é importante ressaltar que os modelos utilizados para estimativa do volume por meio da análise de regressão, mesmo que apresentando fórmulas mais usuais, não devem ser generalizadas, pois como visto anteriormente, cada povoamento possui suas especificidades, e essas devem ser levadas em consideração para a estimativa do volume com precisão.

4.1.3. Redes neurais artificiais

As Redes Neurais Artificiais (RNAs), podem ser definidas como sistemas baseados em estruturas neurais humanas, capazes de processar dados por meio de princípios como semelhanças, aprendizagem e a generalização das informações (BINOTI, et al, 2012; BRAGA et al., 1998). Ainda segundo os autores, essa possibilidade se deve ao processamento paralelo e em razão da grande conectividade dos elementos do processamento colocados em uma ou mais camadas.

Castellanos et al., (2007), afirmam em sua pesquisa que o emprego das RNAs enquanto ferramenta do manejo florestal, vem para aprimorar técnicas de

biometria e inventário florestal, permitindo uma maior acurácia na estimação da produção e dando suporte às tomadas de decisão para os povoamentos de interesse.

As características mais importantes das RNAs baseiam-se no mapeamento de entrada e saída, na tolerância a falhas e ruídos e na adaptabilidade dos pesos das conexões para as modificações do ambiente, portanto, uma rede treinada é capaz de ser retreinada, ou projetada para modificar seus pesos em tempo real (BINOTI, 2014).

De acordo com Braga (2000), a capacidade de aprender e generalizar a informação aprendida é a principal vantagem da solução de problemas através de uma RNA. A generalização está diretamente correlacionada à capacidade de a rede aprender por meio de um conjunto menor de exemplos e posteriormente apontar respostas para os dados não conhecidos (GORGENS et al., 2009).

Em uma RNA, cada neurônio corresponde a uma unidade de processamento formada por uma função de ativação que gera um valor de saída para o neurônio, por meio do somatório dos valores existentes em camadas que chegam a ele. Segundo Brondino (1999), esta organização das camadas de uma RNA que definem sua estrutura topológica ou sua arquitetura (maneira como os elementos de processamento são organizados).

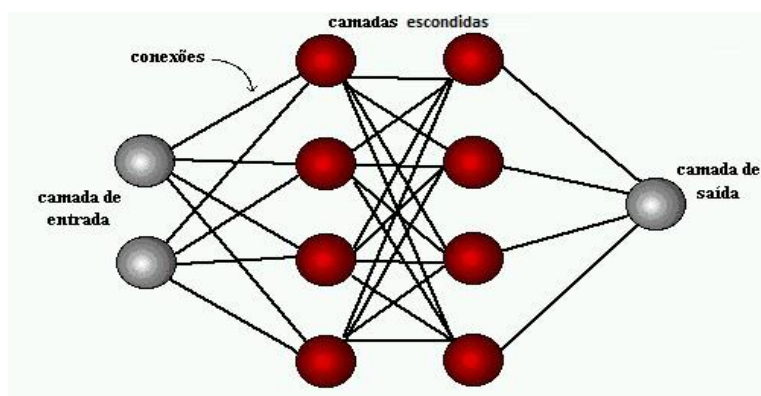


Figura 6: Arquitetura de uma RNA contendo duas camadas intermediárias. Fonte: Abdalla et al. (2013).

Existem redes neurais de camada simples constituídas por um grupo de neurônios também conhecidos como *perceptrons*, arranjados somente uma camada, e as redes formadas por multicamadas MLP (*Multi-Layer Perceptron*) que ficam escondidas ou pela combinação de várias redes de camadas simples

(ADBALA et al., 2013). Um modelo de neurônio representado de maneira simplificada é citado por Vendruscolo (2017), sendo expresso pela Equação 4:

$$y_k = \varphi(x_k) \quad (4)$$

Onde: y_k = saída do neurônio artificial; φ = função de ativação; x_k = resultado do combinador linear, de forma que o combinador é representado pela Equação 5:

$$x_k = \sum_{m=1}^m x_m w_m \quad (5)$$

Onde: $x_k = x_m$ é o número de entradas; e w_m é o peso para cada entrada de m .

As RNAs podem apresentar diferentes tipologia, ou seja, composições estruturais com diferentes quantidades de neurônios nas camadas de entrada, intermediária e de saída da rede, conforme a Figura 7.

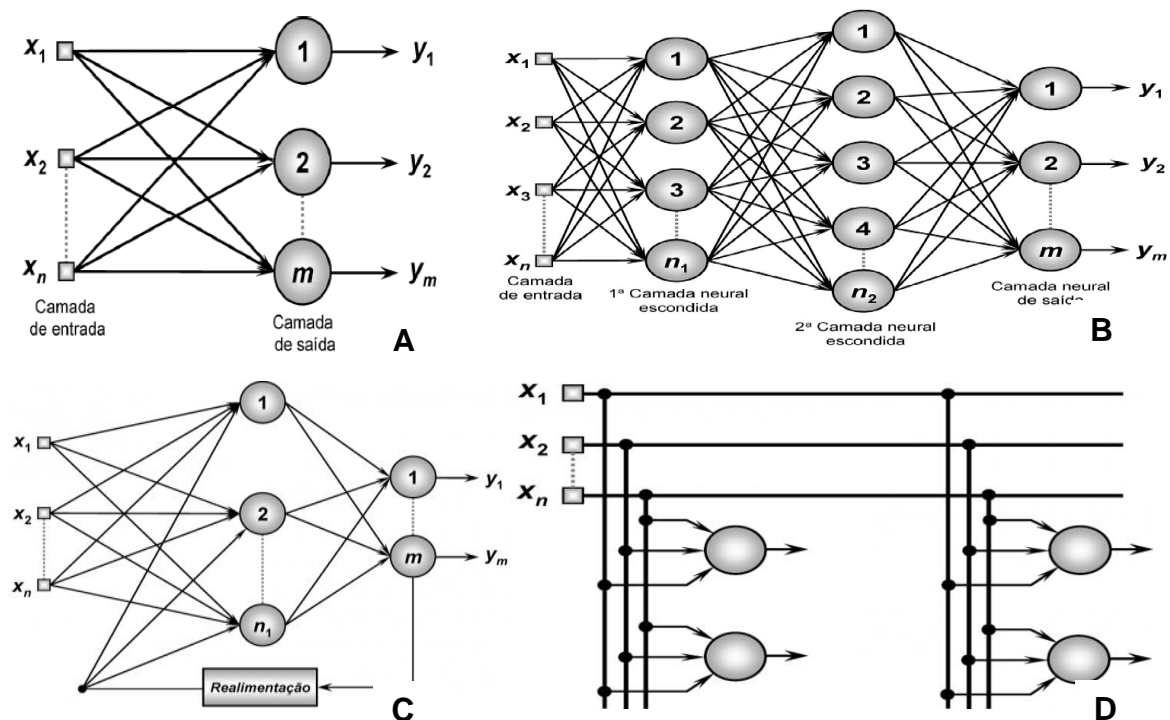


Figura 7: Arquitetura de uma RNA: A – Feed Forward de Camada Simples, B – Feed Forward de Camadas Múltiplas, C - Recorrente ou Realimentada e D - Estrutura Reticulada. Fonte: Silva et al. (2010)

Nas camadas intermediárias ocorre o processamento dos dados com a aprendizagem e na camada de saída se apresentam os resultados do processamento. Abdalla et al. (2013) e Gorgens (2006), afirmam que é feita uma atribuição de pesos aos dados de entrada de uma RNA, o que irá determinar o nível de ativação da unidade na rede. Dessa forma a magnitude da rede fica determinada

pelo treinamento repetitivo, buscando a conversão dos dados de entrada para um valor de saída, conhecido do conjunto de treinamento para cada amostra definida.

O dimensionamento das camadas intermediárias não é uma tarefa de simples resolução, mas existem métodos empíricos para dimensioná-la (BULLINARIA, 2003), pois o excesso de neurônios pode induzir ao *overfitting*, que é a memorização de ruídos levando ao baixo poder de generalização, e o baixo número de neurônios pode acarretar em um custo temporal elevado, não permitindo um resultado ótimo para as respostas, ou seja, valores próximos aos valores obtidos por outras metodologias aplicáveis de saída da rede (HAYKIN, 2001). Uma alternativa para definir os principais parâmetros de uma RNA é utilizar trabalhos já realizados como referência (BLASCHKE et al., 2000).

Diamantopoulou (2005) afirma em seus trabalhos que as RNAs, são superiores em relação aos algoritmos de regressão não lineares para estudar o volume de casca em espécies de Pinus e concluiu que as RNAs têm grande potencial para muitas aplicações em modelagem florestal, sendo útil como alternativa às tradicionais.

Os modelos de RNA estão se tornando uma ferramenta de estimação muito popular, pois não necessitam de suposições sobre as relações entre as variáveis utilizadas no ajuste (VENDRUSCOLO et al., 2017). Em vez disso, a rede é treinada e se encarrega de modelar as relações lineares e não lineares. Vários estudos defendem a eficiência da aplicação de RNA na área florestal, observando alta precisão nos dados testados (LEITE et al., 2010; GORGENS et al., 2009; AVRAMIDIS et al., 2006; DIAMANTOPOULOU, 2005).

Leal et al. (2015) trabalhando com a aplicação de RNAs e modelos de regressão ajustados a partir das equações de Schumacher e Hall e Prodan para estimar o volume da madeira de *Eucalyptus urophylla*, verificaram que ambos os métodos apresentaram estatísticas de ajuste e precisão aceitáveis, dando destaque para o desempenho das redes neurais por apresentarem uma estimativa de erro padrão de 1,91%, e um alto coeficiente de determinação (0,99), quando comparadas a regressão que apresentou o erro de 8,66% e coeficiente de determinação de 0,66.

Silva et al. (2009), testando modelos de Schumacher e Hall e a aplicação de RNAs para a estimação do volume de clones de *Eucalyptus* spp., observaram que as RNAs são altamente recomendadas para previsão volumétrica da produção de

florestas plantadas. Essas afirmativas corroboram com os resultados encontrados por Miguel et al. (2015), quando avaliou a eficácia da aplicação de modelos de análise de regressão e RNAs na predição do volume de madeira em área de cerradão, a partir de imagens de satélite, observaram que as equações de regressão ajustada apresentaram um r de 0,96-0,97 e um erro de 9,72-11,92%, já nas RNAs o ajuste foi de 0,99 e o erro variou de 4,83-4,93%.

Binoti et al. (2014) estudando protocolos a fim de estabelecer uma metodologia para estimativa de volume em povoamentos de eucalipto, com a utilização de RNA, para reduzir o número de árvores a serem cubadas durante o processo de geração de equações volumétricas, verificaram que, dividindo os dados de diâmetro e altura, e jogando aleatoriamente em duas partes: 80% para treinamento em MLP das redes e 20% para generalização, obtiveram eficiência na estimação do volume de árvores

Segundo Silva et al. (2009), Binoti et al. (2014) e Miguel et al. (2016) para *Eucalyptus spp.* e Diamantopoulou e Milios (2010) para *Pinus brutia*, a utilização da inteligência artificial aparece como uma opção de grande potencial, pois é eficaz tanto na estimativa quanto na predição do volume.

Leal et al. (2015), ressalta que o desempenho das redes neurais artificiais é superior à regressão. Colaborando com os autores acima citados, que utilizaram as RNAs para estimar o volume da madeira, afirmando que elas podem ser indicadas para a obtenção do volume total com e sem casca de povoamentos florestais.

4.1.4. Geoestatística

No início dos anos 50 Daniel Gerhardus Krige verificou, quando trabalhando com atividades voltadas para a mineração, que na amostragem clássica, as variâncias obtidas não levavam em consideração a distância entre as amostras nem a sua configuração geométrica, levando a uma menor precisão para a estimativa do erro amostral (MELLO, 2004).

Com base nas observações feitas por Krige, no ano de 1963 Georges Matheron, desenvolveu a Teoria das Variáveis Regionalizadas, que foi definida como uma função espacial numérica, variando de um local para outro, e

apresentando continuidade aparente, onde a variação não pode ser representada por uma simples função matemática, de modo que a aplicação dessa teoria à problemas voltados para a geologia e mineração recebeu o nome de geoestatística (MELLO, 2004; SANTOS, 2014; LUNDGREN et al., 2015).

A geoestatística, no que se refere a teoria das variáveis regionalizadas pressupõe que cada dado $z(x_i)$ é modelado como uma variável aleatória podendo ser expressa através da soma de três componentes: estrutural, associado a um valor médio constante ou a uma tendência constante; aleatório, espacialmente correlacionado; e um erro aleatório (MELLO, 2004). Assim desde a década de 60, a geoestatística vem sendo aplicada em diversas áreas das Geociências, não apenas na pesquisa e avaliação mineral, mas também, entre outras, em hidrogeologia, cartografia, geologia ambiental, geotecnia entre outras.

4.1.4.1. Semivariograma

Segundo Landim (2006), o semivariograma pode ser classificado como uma importante ferramenta da geoestatística, que com base na correção da distância entre os pontos amostrais com a semivariância gera um gráfico de dispersão. Lundgren et al. (2015) citam em seus trabalhos que para gerar os dados de dispersão, o semivariograma trabalha basicamente com três parâmetros que são usados nos ajustes de modelagem dos dados:

- O alcance, definido como a distância máxima até onde se percebe o efeito da dependência espacial;
- O patamar, compreendido como a semivariância encontrada precisamente onde está o alcance; e
- O efeito pepita, ou seja, a semivariância encontrada quando se tem uma distância igual a zero.

O uso de métodos geoestatísticos em pesquisas do setor florestal, aumentou expressivamente nas últimas décadas (AUBRY e DEBOUZIE, 2000). Várias dessas pesquisas tiveram como ponto de partida a avaliação da dependência espacial por meio do semivariograma.

O conceito de semivariograma é elucidado por Melo (2006) como a parte central da geoestatística, capaz de descrever a estrutura de dependência espacial, e sendo caracterizado como fator primordial na determinação do preditor geoestatístico (Krigagem). Estes fatos demonstram a importância de se tratar adequadamente a questão da seleção e ajuste de modelos espaciais nos semivariograma experimentais.

Segundo Sturaro (2016), os semivariogramas experimentais são construídos com base em malhas com disposição regular e, quando irregulares, são posteriormente regularizadas. Ainda de acordo com o autor, após a confecção dos semivariogramas dos valores experimentais, procura-se ajustar um modelo matemático que represente o mais próximo possível a configuração dos mesmos.

Embora possa existir uma infinidade de funções que se ajustem aos semivariogramas experimentais, a prática tem mostrado que existem alguns modelos, fundamentados nas suposições teóricas das variáveis regionalizadas (STURARO, 2016; LUNDGREN et al., 2015), conforme apresentados na tabela 3.

Tabela 3: Modelos teóricos de semivariograma

Definição do Modelo de Semivariograma	Equações de ajuste
Modelo Esférico: o ajuste mais comum da geoestatística, principalmente no estudo dos depósitos minerais (DAVID, 1977).	$\gamma(h) = \begin{cases} C_0 + C_1 \left[\frac{3h}{2a} - \frac{1}{2} \left(\frac{h}{a} \right)^3 \right], & 0 < h < a \\ C_0 + C_1, & h \geq a \end{cases}$
Modelo Exponencial: o ajuste se faz através da curva exponencial. O patamar (c) é a assíntota desta curva e a amplitude variográfica (a) corresponde ao encontro da tangente da curva na origem com o patamar (DAVID, 1977).	$\gamma(h) = C_0 + C_1 \left\{ 1 - \exp \left(-3 \frac{h}{a} \right) \right\}$
Modelo Gaussiano: a função é parabólica próxima a origem. Este modelo apresenta amplitude variográfica extensa e o patamar semelhante ao modelo exponencial (DAVID, 1977).	$\gamma(h) = c \left[1 - e^{-h/a} \right]$

Legenda: 'Co' é o efeito pepita; 'Co+C1' o patamar; 'a' o alcance; e 'h' a distância em metros.

Por meio do semivariograma experimental, é possível definir o modelo que descreve o comportamento dos dados no espaço, com maior precisão (JOURNEL e HUIJBREGTS, 1978 citado por MELLO, 2009). Em seguida, sua preocupação se volta para o ajuste da função matemática ao semivariograma experimental ou aos dados.

Sturaro (2016), relata em seus estudos que até a década de 80, o ajuste do modelo espacial ao semivariograma experimental, era feito de forma visual, sem auxílio de um procedimento matemático, mas com o aumento da capacidade dos recursos computacionais, outros métodos de ajuste têm sido estudados, dentre eles, podem ser citados: Métodos dos Quadrados Mínimos Ordinários, Ponderados e o Método da Máxima Verossimilhança.

Segundo Guimarães (2004) o semivariograma é uma ferramenta da geoestatística que aceita verificar e modelar a dependência espacial de uma variável, já a aplicação do semivariograma é o emprego das informações geradas na interpolação. O interpolador que usa o semivariograma em sua modelagem é chamado de Krigagem. Também pode ser usado na cokrigagem que é uma extensão da Krigagem.

Após a escolha do modelo e a estimativa dos parâmetros, a etapa seguinte é estudar o melhor modelo de semivariograma ajustado usando critérios da (*kaike's Information Criterion (AIC)*) (Akaike, 1983), ou pelo meio das técnicas de validações cruzada e preditiva. Segundo Landim (2002), se usam geralmente duas técnicas básicas na geoestatística, a Krigagem e cokrigagem.

4.1.4.2. Krigagem e co-Krigagem

O termo Krigagem é proveniente de uma derivação do nome de Daniel G. Krige, citado acima, como um pioneiro promovendo o uso de médias móveis para evitar a superestimação sistemática, no caso dele, voltadas para a mineração.

Krigagem é um estimador espacial, que possui como base os dados amostrados de uma variável regionalizada, e as propriedades estruturais do semivariograma. Krigagem é um método de inferência espacial, o qual é capaz de

estimar dados em pontos não amostrados, a partir dos pontos obtidos, considerando a dependência espacial (MELLO, 2004). Para Landim (2006), a Krigagem pode ser usada, como algoritmo estimador, para:

- Previsão do valor pontual de uma variável regionalizada em um certo local dentro do espaço geométrico, logo, caracteriza-se por um procedimento de interpolação exato que atende todos os valores constatados, podendo assumir a função de apoio para cartografia automática quando se dispõe de valores de uma variável regionalizada dispostos por uma determinada área;
- Cálculo médio de uma variável regionalizada para uma capacidade maior que o suporte geométrico. É de extrema importância ter cuidado na análise variográfica para que se possa obter uma criteriosa análise geoestatística.

Segundo Lundgren (2011), a Krigagem envolve um conjunto de métodos de predição, podendo serem citadas: Krigagem simples, Krigagem ordinária, Krigagem universal, Co-Krigagem, Krigagem disjuntiva, entre outras. Outro fato relevante mencionado pelo autor corroborando com os trabalhos feitos por Landim (2006) é que a Krigagem fornece, além dos valores estimados, o erro associado a tal estimativa, o que o diferencia dos demais algoritmos existentes.

Na Krigagem ordinária, mais comumente utilizada, quando se deseja estimar um determinado ponto, o valor desconhecido é representado pela variável V , onde o valor estimado (V^*) é calculado utilizando um número “ n ” de amostras identificadas por coordenadas conhecidas, com valores $x_1, x_2, x_3 \dots x_n$ (conjunto S), de forma linear, como por exemplo, através da técnica da ponderação pelo inverso das distâncias (LANDIM, 2006; STURARO, 2016).

A Krigagem parte do princípio, que os pontos mais próximos, tendem a ter valores parecidos, assim a técnica presume que os dados recolhidos de uma população estão auto correlacionados no espaço (LEAL, 2013).

Existe também o método de cokrigagem, que é uma extensão multivariada do método da Krigagem, citada por Lundgren et al. (2017) e Landim (2002), onde o raciocínio é o mesmo da Krigagem, porém nessa técnica, além dos valores do atributo estudado próximos ao local onde o valor será estimado, é adicionado o valor de outro atributo correlacionado com o atributo desejado, chamado de variável secundária. Os autores ainda afirmam que para que faça sentido o uso da técnica

de cokrigagem, é interessante que a variável secundária seja de mais fácil medição que a variável primária e que possuam forte correlação entre si, como exemplo podem ser citadas o volume e o diâmetro a 1,30 m do solo, como variáveis primária e secundária respectivamente.

De acordo com Landim (2002), na cokrigagem os valores ausentes dentro de um mesmo domínio espacial, não são considerados como problema, pois o método ainda pode ser utilizado mesmo quando uma variável está subamostrada em relação as demais. Ainda de acordo com o autor, a cokrigagem compõe uma ferramenta da geoestatística cada vez mais utilizada, pois ela é capaz de melhorar as estimativas da variável de interesse, que está subamostrada, por meio do uso daquelas mais densamente amostradas.

Lundgren et al. (2017) estimaram o volume total da madeira de eucalipto de um povoamento em pé e comparando as técnicas de Krigagem e cokrigagem observaram que a Krigagem obteve uma estimativa melhor com erro percentual de 6,69% e a cokrigagem 10,08% com 200 amostras, já com 50 amostras teve um erro de 1,11% e 5,10% respectivamente. Segundo o autor este erro considerado comum para os padrões de manejo florestal onde os erros de estimativa de volume geralmente estão em torno de 5% quando usada a regressão.

Em outro trabalho Lundgren et al. (2015) verificaram se o DAP fornece estimação precisa do volume de madeira em floresta plantada de eucalipto, realizaram uma comparações com técnicas estimacão Krigagem, cokrigagem e regressão, e observaram que a regressão foi a melhor técnica para estimativa de volume e que teve um erro de 0,07%, enquanto que a cokrigagem forneceu um valor de erro de 1,12% na estimativa total e a Krigagem teve um erro de 1,74%, um erro percentual menor que 5% valor comumente considerado baixo para inventários florestais.

Santana (2011) avaliou estimativas do volume da madeira de um povoamento de *Tectona grandis* L.f. estimados a partir do uso da Krigagem e regressão, observou que a Krigagem obteve um erro de 2,49%, enquanto que a regressão apresentou um erro de 12%.

Mello (2004) comparou as estimativas efetuadas por talhão de povoamento de eucalipto, quanto aos estimadores clássicos e geoestatísticos onde pôde observar que a diferença média entre o volume total gerado pelo estimador clássico e o geoestatísticos foi de 1%, com a variação do erro de 9% a 32% para o clássico e 8% a 12% para os geoestatísticos. Além disso o erro amostral por talhão em porcentagem variou menos no estimador geoestatísticos.

A geoestatística, porém, não é apenas composta pela Krigagem ou cokrigagem, ela pode ser baseada em ferramentas que visam entender a aparente aleatoriedade dos dados, porém com uma possível estruturação espacial, estabelecendo, desse modo, uma função de correlação espacial entre os pontos de interesse. E, quando se refere a acurácia dos resultados obtidos, de acordo com Landim (2003) as estimativas realizadas por Krigagem, tendem a atingir os melhores resultados.

3.2 Comparação entre as metodologias analisadas

Na tabela 4, estão apresentados alguns trabalhos desenvolvidos, com vistas a avaliar e/ou comparar as metodologias utilizadas para a estimativa do volume de madeira, bem como os percentuais de erro encontrados, tomados como base para a discussão desse trabalho.

Tabela 4 - Coeficiente de determinação ajustado (R^2_{aj}) e erro padrão (%) da estimativa relativo, a partir da aplicação de modelos para a estimativa de volume, testados em povoamentos e florestas nativas.

Espécie	Método	R^2_{aj}	Erro (%)	Autor
Eucalipto	Regressão/modelo de Spurr	0,91	0,07	Lundgren et al. (2015)
Pinus	Regressão/Schumacher-Hall	0,99	9,7	Thomas et al. (2006)
Teca	Regressão/Schumacher-Hall	0,98	3,44	Drescher et al. (2014)
Pinus	Regressão/Schumacher-Hall e Spurr		5,58 e 7,05	Mendonça et al. (2015)
Araucária	Regressão/modelo de Spurr log	0,99	8,33	Sanquetta et al (2016)

Continuação...				
Eucalipto	Regressão/Prodan e Schumacher e Hall	0,60	8,86	Leal et al. (2015)
Floresta nativa	Regressão	0,96-	9,72-	Miguel et al. (2015)
Cerrado		0,97	11,92	
Eucalipto	RNA	0,99	1,91	Leal et al. (2015)
Floresta nativa	RNA	0,99	4,83-	Miguel et al. (2015)
Cerrado			4,93	
Eucalipto	RNA	0,99	4,18	Binoti et al. (2014)
Teca	RNA	0,90	6,08	Vendruscolo (2017)
Eucalipto	RNA	0,99	1,9	Binoti et al. (2013)
Eucalipto	Geoestatística/Krigagem	0,57	1,74	Lundgren et al. (2015)
Eucalipto	Geoestatística/cokrigagem	0,85	1,12	Lundgren et al. (2015)
Eucalipto	Geoestatística/Krigagem	-	8,0	Mello (2004)
Teca	Geoestatística/Krigagem	-	2,49	Santana (2011)
Eucalipto	Geoestatística/Krigagem	-	1,10	Lundgren et al. (2017)
Eucalipto	Geoestatística/cokrigagem	-	5,10	Lundgren et al. (2017)

Dentre os trabalhos observados que fizeram o uso dos métodos de regressão foi possível verificar que o erro padrão variou de 0,07% a 11,92%, já os métodos com o uso das técnicas das RNA a variação foi de 1,9% a 6,08%, e os que utilizaram geoestatística apresentaram uma variação do erro de 1,12% a 8%.

Comparando RNA, geoestatística e regressão em povoamentos de teca, a geoestatística apresentou um menor erro o que resultou em um erro de 1,10%, corroborando com esse resultado, Santana (2011) comparou regressão e geoestatística, demonstrou que a metodologia da geoestatística foi a melhor, pois oferece predições com variância minimizada em vista da metodologia da regressão.

Já em trabalhos apresentados com eucalipto, os resultados obtidos foram satisfatórios e revelaram que as RNAs se sobressaíram em relação a geoestatística e regressão, contudo, os resultados adquiridos pela metodologia de regressão e geoestatística também são considerados satisfatórios, com erro padrão da estimativa inferior a 10%.

Miguel et al. (2015) compararam estimativas de volume em florestas nativas usando metodologias de RNA e regressão, a melhor metodologia foi a de RNA que

teve um erro padrão da estimativa de 4,83% já na regressão de forma mais acentuada com valores de 9,72 %, segundos autores esses altos valores de r encontrados na regressão foram influenciados pela variável área basal, devido ser uma floresta nativa.

Autores como Muukkonen & Heiskanen (2005), que estimaram o volume de madeira e a biomassa de florestas boreais na Finlândia encontraram resultados semelhantes no uso de regressão. Segundo Egrioglu et al. (2014), a diminuição do erro das RNAs é cominada sobretudo à não exigência de uns pressupostos estatísticos como a normalidade ou linearidade dos dados.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

As pesquisas citadas desse trabalho, trouxeram uma reflexiva sobre os métodos de estimativa de volume da madeira, com maior acurácia.

O uso das metodologias de RNA e geoestatística, apresentam-se como alternativas viáveis e usuais para a estimativa do volume da madeira quando comparadas aos métodos de regressão.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABAF- **Associação Baiana das Empresas de Base Florestal**. Anuário brasileiro da silvicultura. Santa Cruz do Sul-RS, 2016.56p.

ABDALLA, L. S.; VOLOTÃO, C.F.D.S. **Estudo da configuração de diferentes arquiteturas de redes neurais artificiais MLP para classificação de imagens ópticas**. In: XVI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto-SBSR, Foz do Iguaçu-PR, INPE. 2013.

AKAIKE, H. **Information measures and model selection**. International Statistical Institute, Voorburg, 14p, 1983.

AKOSSOU, A. Y. J.; ARZOUMA, S.; ATTAKPA, E. Y.; FONTON, N. H.; KOKOU, K. **Scaling of teak (*Tectona grandis*) logs by the xylometer technique: accuracy of volume equations and influence of the log length**. Diversity, v. 5, p. 99–113, 2013.

ANDRADE, M. C. R. **Proposta de redução de custos em inventários florestais por meio do uso de técnicas de geoprocessamento**. Divisão de Sensoriamento Remoto Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE. 38p., 2013.

AUBRY, P.; DEBOUZIE, D. **Geostatistical estimation variance for the spatial mean in two-dimensional systematic sampling**. Ecology, v.81, n.2, p.543-553, 2000.

AVRAMIDIS, S.; ILIADIS, L.; MANSFIELD, S. D. **Wood dielectric loss factor prediction with artificial neural networks**. Wood Science Technology, v.40, n.7, p.563-574, 2006.

AZEVEDO, G. B.; OLIVEIRA, G. T. S., BARRETO, P. A. B.; JÚNIOR, V. C. **Estimativas volumétricas em povoamentos de eucalipto sob regime de alto fuste e talhadia no sudoeste da Bahia**. Pesquisa Florestal Brasileira, v. 31, n. 68, p. 309, 2011.

BAIMA, A.V.; SILVA, S.M.S.; SILVA, J.N.M. **Equações de volume para floresta tropical de terra firme em Moju, PA.** In: Silva, J.N.M.; Carvalho, J.O.P.; Yared, J.A.G. (eds). A Silvicultura na Amazônia Oriental: contribuições do projeto silvicultura tropical (Embrapa/DFID). Vol. 2. Embrapa Amazônia Oriental, Belém. p.367-392, 2001.

BATISTA, J.L.F.; MARCHESINI, M.; VIANA, V.M. **Equações de volume para árvores de caixeta (*Tabebuia cassinoides*) no estado de São Paulo e sul do estado do Rio de Janeiro.** Scientia Forestalis, 65: 162-175, 2004.

BELCHIOR, P.R.M.; **Estimação de volume total, de fuste e de galhos em mata secundária no município de rio Vermelho, MG.** 1996. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa-MG.

BIAZUS A, Hora AB, Leite, B. G. P. **Panorama de mercado: painéis de madeira.** BNDES, v.32, 49-90p., 2010.

BINOTI, D.H.B.; Binoti, M.L.M.S.; Leite, H.G. **Configuração de redes neurais artificiais para estimação do volume de árvores.** Revista Ciência da Madeira, v. 5, p. 58-67, 2014.

BINOTI, D.H.B; Binoti, M.L.M.S.; Leite, H.G.; Silva, A.A.L.; Albuquerque, A.C. **Modelagem da distribuição de diâmetros utilizando autômatos celulares e redes neurais artificiais.** Cerne, v. 19, p. 677-685, 2013.

BINOTI, M. L. M. da S.; LEITE, H. G.; BINOTI, D. H. B.; GLERIANI, J. M. **Prognose em nível de povoamento de clones de eucalipto empregando Redes Neurais Artificiais.** Cerne, v. 21, n. 1, p. 97-105, 2015.

BINOTI, M. L. M. S. **Emprego de redes neurais artificiais em mensuração e manejo florestal.** 2012. 130f. Tese (Doutorado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2012. Disponível em: <http://www.bibliotecaflorestal.ufv.br>. Acesso em: dezembro de 2017.

BINOTI, M. L. M. S.; Binoti, D. H. B.; Leite, H. G.; Garcia, S. L. R.; Ferreira, M. Z.; Rode, R.; Silva, A.A.L. **Redes neurais artificiais para estimação do volume de árvores**. Revista Árvore, v. 38, p. 283-288, 2014.

BLASCHKE, T.; Lang, L.; Lorup, E.; Strobl, J.; Zeil P. **Object-Oriented Image Processing in na Integrated GIS/ Remote Sensing Environment and Perspectives for Environmental Applications**. Vol. 2,555-570, 2000.

BRAGA, A. P.; Carvalho, A. P. L. F.; Ludemir, T. B. **Fundamentos de redes neurais artificiais**. Rio de Janeiro: DCC/I, COPPE/ Sistemas, NCE/UFRJ, 1998. 246p.

BREPOHL, D. **O reflorestamento com incentivos fiscais no Estado do Paraná**. Floresta, Curitiba, v. 11, n. 1, p. 62-66, 1980.

BRONDINO, N.C.M. **Estudo da Influência da Acessibilidade no Valor de Lotes Urbanos Através do Uso de Redes Neurais**. 1999, 97p. Dissertação (Doutorado em Engenharia Civil – Transportes) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos. 1999.

BULLINARIA, J. A. **Introduction to neural network**. Disponível em <<http://www.cs.bham.ac.uk/~jxb/inn.html>>. Acesso em: janeiro 2018.

CABACINHA, C. D. **Um método para a realização do inventário florestal suprimindo a cubagem rigorosa**. 2003. 116p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG.

CAMPOS, J. C. C.; Leite, H. G. **Mensuração florestal: perguntas e respostas**. 4. ed. Viçosa: UFV, 2013. 605 p.

CASTELLANOS, A.; Blanco, A. M.; Palencia, V. **Applications of radial basis neural networks for area forest**. International Journal Information Theories and Applications, v.14, p.218-222, 2007.

CASTRO, R. V. O.; Soares, C. P. B.; Martins, F. B.; Leite, H.G. **Crescimento e produção de plantios comerciais de eucalipto estimados por duas categorias de modelos**. Pesquisa Agropecária, Brasília, v. 48, n. 3, p.287-295, mar. 2013.

CONRADO, V. N.; Souza, G. S. A.; Martins, B. F.; Quinto, V. M.; Silva, E.

Potencialidades da silvicultura em mosaico nas zonas de amortecimento de unidades de conservação. 2014. Disponível em:< <http://www.ciflorestas.com.br>>. Acesso em: janeiro de 2018.

DAVID, M. **Geostatistical or reverse estimation.** New York, Elsevier Scientific, 1977. 364p.

DIAMANTOPOULOU, M. J. **Artificial neural networks as an alternative tool in pine bark volume estimation.** Computers and Electronics in Agriculture, v.10, n.3, p.235-244, 2005.

DRESCHER, R.; GAVA, F. H.; PELISSARI, A. L.; ACOSTA, F. C.; SILVA, V. S. M. **Equações volumétricas para Tectona grandis Linn F. em povoamentos jovens no estado de Mato Grosso.** Advances in Forestry Science, v. 1, n. 2, p. 65-70, 2014.

EGRIOGLU, E.; YOLCU, U.; ALADAG, C.H.; BAS, E. **Recurrent multiplicative neuron model artificial neural network for non-linear time series forecasting.** Procedia - Social and Behavioral Sciences, v.109, p.1094-1100, 2014.

FARIA, G. A.. **Uso de um Sistema de Informação Geográfica para análise geoestatística em solos**– Lavras: UFLA, 2013. 113 p. Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Lavras, 2013.

GAMA, J. R. V, Souza AL, Calegário N & Lana GC. **Fitossociologia de duas fitocenoses de Floresta Ombrófila Aberta no Município de Codó, Estado do Maranhão.** Revista Árvore, 31:465-477,2007.

GOMES, A.M.A. **Medição dos arboredos.** Lisboa: Livraria Sá da Costa, 1957. 413p.

GORGENS, E. B.; LEITE, H. G.; SANTOS, H, N.; GLERIANI, J, M. **Estimação do volume de árvores utilizando Redes Neurais Artificiais.** Revista Árvore, Viçosa, v. 33, n. 6, p. 1141-1147, 2009.

GUIMARÃES, E C. **Geoestatística básica e aplicada**. Uberlandia: ufu, 2004. 77p.

HAYKIN, S. **Redes neurais: princípios e prática**. 2. ed. Porto Alegre: Bookman, 2001. 900 p.

IBÁ – Indústria Brasileira de Árvores. **Relatório 2015**, São Paulo/SP., 80 pg., 2015.

IBAMA. **Manual de Fiscalização**. Brasília, 2002. 276p.

JOURNEL, A.G.; Huijbregts, C.J. **Mining geostatistics**. London: Academic Press, 1978. 600p.

Krige D.G. **A statistical approach to some basic mine valuation problems on the Witwatersrand**. Journal of the Chemical, Metallurgical and Mining Society of South Africa, Dec. 1951:119-139, 1951

LACHINI, E. **Efeito da Idade na Estimativa do Volume de árvores de *Pinus caribaea* var. *hondurensis* e *Pinus oocarpa***. 44 f. Monografia (Graduação em Engenharia Florestal) – Universidade Federal do Espírito Santo, Jerônimo Monteiro, 2010.

LANDIM, P. M. B. **Análise Estatística de Dados Geológicos**. 2. ed. São Paulo: Unesp, 2003, 253p.

LANDIM, P. M. B. **Sobre geoestatística e mapas**. Terra e Didática, v. 2, n. 1, p. 19-33, 2006.

LANDIM, P. M. B.; Sturaro, J. R.; Monteiro, R. C. **Exemplos de Aplicação de cokrigagem, UNESP /Campus de Rio Claro**. Departamento de Geologia Aplicada.

LEAL, F. A., Miguel, E. P., Matricardi, E. A. T., Pereira, R. S. **Redes neurais artificiais na estimativa de volume em um plantio de eucalipto em função de fotografias hemisféricas e número de árvores**. Revista Brasileira de Biometria, v. 33, n. 2, p. 233-249, 2015.

LEITE, F. S. L. **Estimativa do volume de madeira a partir do diâmetro da cepa em uma área explorada de floresta amazônica de terra firme**. Brasília, DF: UnB,

2008. 74 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2008.

LEITE, F. S; Resende, A. V. **Estimativa do volume de madeira partindo do diâmetro da cepa em uma área explorada de floresta amazônica de terra firme.** Revista Ciência Florestal, Santa Maria, v. 20, n. 1, p. 69- 79, 2010.

LEITE, H. G. et al. **Estimation of inside-bark diameter and heartwood diameter for *Tectona grandis* Linn. trees using artificial neural networks.** European Journal of Forest Research, v.130, n.2, p.263-269, 2010.

LEITE, H. G.; Andrade, V. C. L. **Importância das variáveis altura dominante e altura total em equações hipsométricas e volumétricas.** Revista Árvore, v.27, n.3, p.301-310, 2003.

LEITE, H. G.; Oliveira, F. H. T. **Statistical procedure to test the identity of analytical methods.** Communications in Soil Science and Plant Analysis, v. 33, n.7/8, p.1105-1118, 2002.

LIMA, G. C. P. **Comparação de diferentes métodos de cubagem de madeira de povoamento de *Pinus taeda* L. na região serrana de Santa Catarina.** Dissertação (Mestrado) – Universidade do Estado de Santa Catarina, Centro de Ciências Agroveterinárias, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, Lages, 2015. 2015.

LUNDGREN, W. J. C. **Uso da geoestatística na estimativa volumétrica de clones de eucalyptus sp no Pólo Gesseiro do Araripe.** Tese (Doutorado em Ciências Florestais) – Universidade Federal Rural de Pernambuco, 165p .2011.

LUNDGREN, W. J. C.; Silva, J. A. A. D.; Ferreira, R. L. **Estimating of the Volume of Eucalyptus with Kriging and Cokriging in Semi-arid of Pernambuco.** Floresta e Ambiente, v. 24, 2017.

LUNDGREN, W. J. C.; Silva, J. A. A. D.; Ferreira, R. L. **Sampling Type Influence in the Estimation of Eucalyptus Wood Volume by Kriging.** Floresta e Ambiente, v. 23, n. 4, p. 511-523, 2016.

LUNDGREN, WJC; Silva. J. A. A; Ferreira, R.L.C. **Estimação do volume de madeira de eucalipto por cokrigagem, Krigagem e regressão.** Revista Cerne, v. 21(2), p. 243-250, 2015.

MACHADO, A. M.; FIGUEIREDO FILHO, A. Dendrometria. Curitiba, 2003. 309p

MACHADO, S.A.; Nadolny, M.C. **Acuracidade da cubagem rigorosa de árvores pelos métodos de Hohenadl, FAO e Gráfico, comparativamente ao xilômetro.** In: CONGRESSO FLORESTAL PANAMERICANO, 1.; CONGRESSO FLORESTAL BRASILEIRO, 7., 1993.

MELLO, J. M. de. **Geoestatística aplicada ao inventário florestal.** Tese (Doutorado). Programa de Pós-graduação em Recursos Florestais-Universidade de São Paulo, 104p. 2004.

MELLO, J. M.; Diniz, F. S.; DE Oliveira, A. D.; Scolforo, J. R. S.; Júnior, F. W. A.; Thiersch, C. R. **Métodos de amostragem e geoestatística para estimativa do número de fustes e volume em plantios de *Eucalyptus grandis*.** Revista Floresta, v. 39, n. 1, 2009.

MENDONÇA, A. R.; Pacheco, G. R.; Vieira, G. C.; da Silva Araújo, M.; Interamnense, M. T. **Identidade de modelos para estimativa do volume de pinus.** Nativa, 3(4), p.281-286, 2015.

Miguel, E. P.; Mota, F. C. M.; Teo, S. J.; Nascimento, R. G. M.; Leal, F.A.; Pereira, R. S.; Rezende, A. V. **Artificial intelligence tools in predicting the volume of trees within a forest stand.** African Journal of Agricultural Research, v. 11, n. 21, p.1914-1923, 2016.

MIGUEL, E. P.; Rezende, A. V.; Leal, F. A.; Matricardi, E. A. T.; Vale, A. T. do; Pereira, R. S. **Redes neurais artificiais para a modelagem do volume de madeira e biomassa do cerradão com dados de satélite.** Pesquisa Agropecuária Brasileira, Brasília, v. 50, n. 9, p. 829-839, set. 2015.

MUUKKONEN, P.; Heiskanen, J. **Estimating biomass for boreal forests using ASTER satellite data combined with standwise forest inventory data**. Remote Sensing of Environment, v.99, p.434-447, 2005. DOI: 10.1016/j.rse.2005.09.011.

NICOLETTI, M. F. **Comparação de métodos não-destrutivos de cubagem de árvores em pé visando à determinação da biomassa**. Dissertação (Mestrado em Ciências) Universidade de São Paulo, 2011.

NOGUEIRA FM. B., Bernardi CJ, Couto EG. **Aplicação da geoestatística para amostragens de solo em planície de inundação**. In: Anais do XXVII Congresso Interamericano de Engenharia Sanitária e Ambiental; 2000; Porto Alegre. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental; 2000.

OLIVEIRA, M. L. R.; Leite, H. G.; Garcia, S. L. R.; Campos, J. C. C.; Soares, C. P. B.; Santana, R. C. **Estimação do volume de árvores de clones de eucalipto pelo método da similaridade de perfis**. Revista Árvore, v. 33, n. 1, 2009.

OLIVEIRA, O. M. de. **Verificação da acurácia do método de Pressler na estimativa do volume de árvores em pé**. 2010. Monografia. Universidade Federal do Espírito Santo. 44p.

PÉLLICO-NETTO S e BRENA DA (1993). **Apostila: Inventário florestal**. Curitiba, UFPR. 245p;

SANQUETTA, C. R. Dolci, M; Corte, A. P. D.; Sanquetta, M.N.I; Pelissari, A. **Estimação de volumes de araucaria angustifolia (bertol.) O. Kuntze por fatores de forma em classes diamétricas e modelos de regressão**. Centro Científico Conhecer - Goiânia, v.13 n.23, 2016.

SANTANA, R. A. **Avaliação de técnicas geoestatísticas no inventário de povoamentos de Tectona grandis L. f.** 2011. 43 p. Dissertação, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa

SANTOS, A. T.; de Mattos, P. P.; Braz, E. M.; Rosot, N. C. **Equação de volume e relação hipsométrica para plantio de Ocotea porosa**. Pesquisa Florestal Brasileira, Colombo, v. 32, n. 69, p. 13-21.

SANTOS, P. C.; Santana, A.C., Queiroz, J. C. B., Barros, P. L. C.; Santana, Á. L. **Estimação volumétrica de resíduos lenhosos de madeira em uma floresta tropical através da Krigagem ordinária, paragominas, estado do pará.** Ciência Florestal, v. 24, n. 4, 2014.

SANTOS, W. C. **Análise de características dendrométricas e fatores edáficos no crescimento e produção de um povoamento de Araucaria angustifolia (Bert.) O. Ktze.** 2006. 125 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2006.

SCHIKOWSKI, A. B. **Estimativa do volume e da forma do fuste utilizando técnicas de aprendizado de máquina.** Dissertação de Mestrado- Programa de Pós-Graduação em Engenharia Floresta, Universidade Federal do Paraná, 71p. 2016.

SCHNEIDER, P.R.; Tonini, H. **Utilização de variáveis dummy em equações de volume para *Acacia mearnsii* Wild.** Ciência Florestal, 13(2): 121-129, 2003.

SCHREUDER, H. T.; Gregoire, T. G.; Wood, G. B. **Sampling Methods for Multiresource Forest Inventory.** John Wiley & Sons, Inc. New York. 446 p. 1993.

Scolforo, HF, Castro Neto, F, Scolforo, JRS, Burkhart, H, McTague, JP, Raimundo, MR, Loos, RA, Fonseca, S, Sartório, RC. (2016). **Modeling dominant height growth of Eucalyptus plantations with parameters conditioned to climatic variations.** Forest Ecology and Management, 380, 182–195.

SCOLFORO, J. R. S. **Modelagem do crescimento e da produção florestal para florestas plantadas e nativas.** Lavras: UFLA/FAEPE, 1998. 453p.

SCOLFORO, J. R. S.; Figueiredo Filho, A. **Biometria Florestal: medição e volumetria de árvores.** Textos técnicos. UFLA. Lavras. 1998. 310p.

SILVA, Eliana N; S, Antônio C. **Modelos de regressão para estimação do volume de árvores comerciais, em florestas de Paragominas.** Revista Ceres, v. 61, n. 5, 2014.

SILVA, I. N. D.; Spatti, D. H.; Flauzino, R. A. **Redes Neurais Artificiais para engenharia e ciências aplicadas - Curso Básico**. São Paulo: Editora Artliber, 397p., 2010.

SILVA, J. A. A. **Princípios básicos da dendrometria**. José Antônio Aleixo da Silva e Francisco de Paula Neto, atualizada por José Imaña Encinas e Otacílio Antunes Santana - Recife: Universidade Federal Rural de Pernambuco, Departamento de Ciência Florestal, 1979. 191 p..

SILVA, M.L.M. da; Binoti, D.H.B.; Gleriani, J.M.; Leite, H.G. **Ajuste do modelo de Schumacher e Hall e aplicação de redes neurais artificiais para estimar volume de árvores de eucalipto**. Revista Árvore, v.33, p.1133-1139, 2009.

SOARES, Carlos Pedro Boechat, 1968; PAULA NETO, Francisco de; SOUZA, Agostinho Lopes de. **Dendrometria e inventário florestal**. 2.ed. Viçosa, MG: Universidade Federal de Viçosa, 2011. 272p.

STERNADT, G.H. **Cubagem de toras de mogno – Comparação do processo do IBAMA e o adotado por madeireiras**. 100 p: ill. Livro – IBAMA – Laboratório de Produtos Florestais, 2001.

STURARO, J. R. **Apostila de geoestatística básica**. Unesp. Departamento de Geologia Aplicada-IGCE. 26p., 2015.

THAINES F, Braz E M, Mattos P P, Thaines AAR. **Equação para estimativa de volume de madeira para a região da bacia do rio Ituxi, Lábrea - AM**. Pesquisa Florestal Brasileira 2010; 30(64): 283-289.

THOMAS, C.; Andrade, C. M.; Schneider, P. R.; Finger, C. A. F. **Comparação de equações volumétricas ajustadas com dados de cubagem e análise de tronco**. Ciência Florestal, 16(3), 2006.

VENDRUSCOLO, D. G. S. **Modelagem aplicada ao manejo de povoamentos de *Tectona grandis* L.f em Mato Grosso**. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais e Ambientais), Universidade Federal do Mato Grosso, 87p. 2017.

VENDRUSCOLO, D. G. S.; Gava, F. H.; Descher, R.; Souza, H. S.; Caldeira, G. V.; Silva, R. S. **Intensidade amostral ótima para a cubagem rigorosa de *Tectona grandis* L.f.** Revista Brasileira de Biometria, v. 34, n. 04, p. 564-574, 2016.

YOUNG, H. E, ROBBINS, W. C, WILSON, S. 1967: **Errors in volume determination of primary forest products.** Pulp e Paper Magazine of Canada, Quebec, v 68, p.389-394, 1967